Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Investigating the Impact of Polymer Membrane Characteristics on the Performance of the Membrane Humidifier

Research Article

Seyyed Morteza Mousavi Zahed[1], Ebrahim Afshari[2]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.81524.1174

1. Introduction

Membrane is generally a selective barrier between two phases and is used to separate one phase from another phase. Today, membranes are used in the industry to separate mixtures, bcause membrane processes have lower costs and higher efficiency than other separation methods. According to Figure 1, the feed flow (water vapor or wet fluid) enters one side of the membrane through the channels that are embedded in the wet side of the membrane, and the water in the feed flow penetrates throughout the membrane. Slow water permeability across the membrane can be due to pressure, concentration, and temperature gradients.

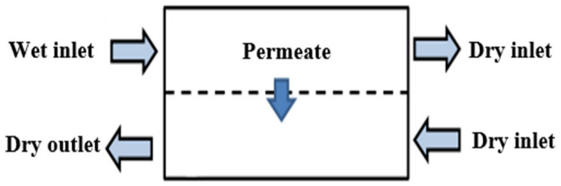


Figure 1. Water and heat transfer in a membrane humidifier

Nafion is a brand name of a polymer made of tetrafluorosulfonic acid, which is formed by the accumulation of sulfonyl chloride and hot sodium hydroxide and has the ability to transfer water and gas. Commercial Nafions, as the most common membranes used in membrane humidifiers, have different thicknesses and specifications. Nafion 111 is less thick than Nafion 115, 117, and 211. Membrane thickness, permeability and porosity coefficient of the membrane are the most important characteristics of Nafion, which affect its performance when used in membrane humidifiers.

2. Numerical modeling

Figure 2 shows the scope of modeling a flat membrane humidifier with an arrangement of simple and parallel channels with opposite flow. Due to the higher concentration of water on the wet side, water is transferred through the pores of the membrane to the dry side (Figure 2).

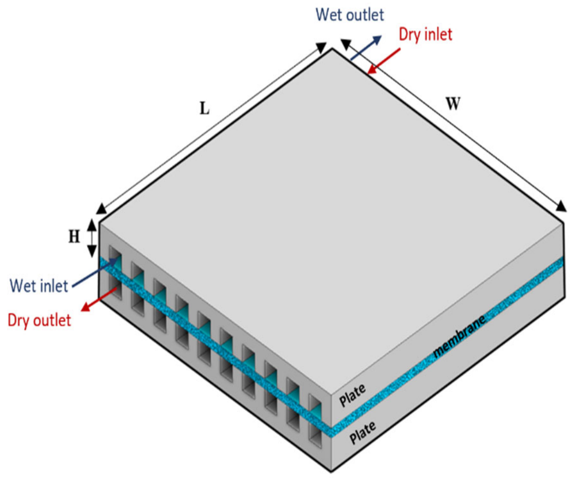


Figure 2. Three-dimensional view of membrane humidifier

3. Results

To validate the numerical modeling done, the results of this study and Yu et al.'s experimental study were compared by selecting the heat flux value as a validation criterion. It can be seen from Figure 3 that there is a great agreement between the studies. The maximum error of the results is less than 4.2% at the highest speed on the side of wet channels.

*Manuscript received: March 8, 2023. Revised, March 19, 2023, Accepted, June 3, 2023.

[1]. M.Sc. student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

[2]. Corresponding author. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran. **Email**: e.afshari@eng.ui.ac.ir

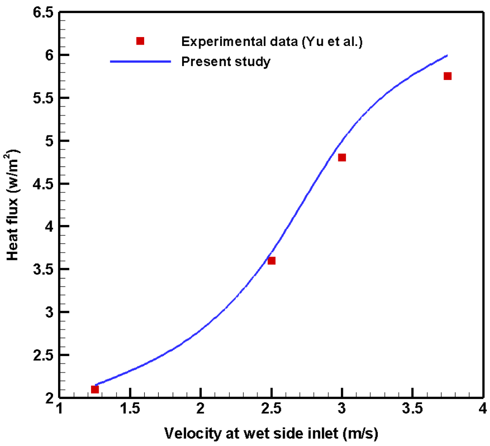


Figure 3. Comparison of dry side outlet heat flux between the experimental results and the present study

Figure 4 shows the impact of the thickness of different membranes on the relative humidity of the outlet of the dry side. Nafion 111 has the highest relative humidity due to its lower thickness.

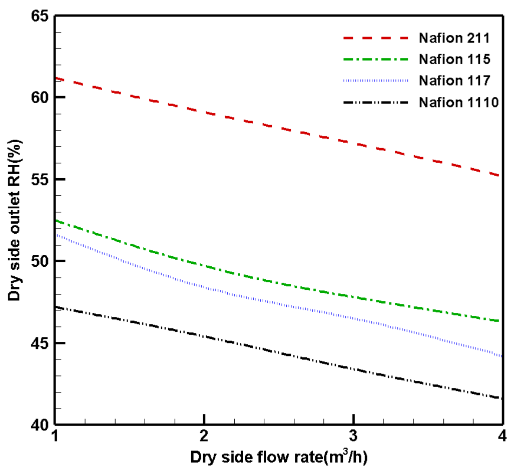


Figure 4. The impact of membrane thickness on the relative humidity of the dry side outlet

4. Conclusion

The most important conclusions of this research are summarized as follows.

1) Along the length of the channels on the dry side of the humidifier, the amount of water transferred through the membrane on the dry outlet side decreases due to the reduction of water transfer, although the amount of heat transferred by the membrane increases near the exit of dry channels;
2) Among the four types of Nafion (Nafion 115, 117, 211, and 111), Nafion 111 has the highest relative humidity, outlet temperature, and dew point temperature on the dry side outlet due to its lower thickness and the best performance among other Nafions;
3) The permeability of Nafion 115 for water with coefficients of 10^{-19} and 10^{-21} is almost the same. By increasing the permeability up to 10^{-15} due to the increase in mass and heat transfer, it causes an increase in relative humidity, heat transfer, and dew point temperature;
4) The porosity coefficient of Nafion 115 in porosity coefficients of 0.4, 0.5, 0.6 and 0.7 does not change much on the performance of the membrane humidifier. If the porosity coefficient increases from 0.4 to 0.7, the relative humidity on the outlet side of dry channels increases by 1.5%.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک
http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir
انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران
دانشگاه فردوسی مشهد

بررسی تأثیر مشخصات غشای پلیمری بر عملکرد مرطوب‌ساز تخت غشایی*

مقاله پژوهشی

سید مرتضی موسوی زاهد(۱) ابراهیم افشاری(۲)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.81524.1174

چکیده *در مرطوب‌ساز غشایی، مشخصات غشا به عنوان قلب مرطوب‌ساز و انتخاب نافیون به عنوان رایج‌ترین غشا برای کاربرد در فرایند جداسازی دو جریان مرطوب و خشک تأثیر زیادی بر عملکرد آن دارد. در این مطالعه، به روش دینامیک سیالات محاسباتی و به کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت و با اضافه کردن یک کد به آن برای شبیه‌سازی انتقال آب در غشا به بررسی سه‌بعدی یک مرطوب‌ساز تخت غشایی شامل نواحی کانال‌های خشک، غشا، کانال‌های مرطوب و صفحات در طرف غشا پرداخته شده و تأثیر مشخصات غشا شامل: ضخامت، نفوذپذیری و ضریب تخلخل بر انتقال جرم (آب) و حرارت از طریق غشا و در نتیجه عملکرد مرطوب‌ساز بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از نافیون ۱۱۱ به دلیل ضخامت کمتر نسبت به نافیون‌های ۱۱۵، ۱۱۷ و ۲۱۱، منجر به بهبود انتقال حرارت و جرم شده و از این‌رو عملکرد مرطوب‌ساز غشایی را بهبود می‌بخشد. با در نظر گرفتن نقطه شبنم که تأثیر هم‌زمان انتقال جرم و حرارت را نشان می‌دهد؛ افزایش ضریب نفوذپذیری غشا از 10^{-21} تا 10^{-15} متر مربع، دمای نقطه شبنم در خروجی سمت خشک حدود ۳/۵ کلوین افزایش می‌یابد. در محدوده‌های متداول ضریب تخلخل غشاهای تجاری متداول، تغییر ضریب تخلخل تأثیر چندانی بر عملکرد مرطوب‌ساز غشایی ندارد.*

واژه‌های کلیدی مرطوب‌ساز غشایی، نفوذپذیری، ضریب تخلخل، ضخامت، دمای نقطه شبنم، مدل‌سازی عددی.

Investigating The Effect of Polymer Membrane Characteristics on The Performance of The Membrane Humidifier

Seyyed Morteza Mousavi Zahed Ebrahim Afshari

Abstract *In the membrane humidifier, the characteristics of the membrane as the heart of the humidifier and the selection of Nafion as the most common membrane for use in the process of separating two wet and dry streams have a great impact on its performance. In this study, a numerical and three-dimensional investigation of a flat membrane humidifier including the dry flow channels, membrane, wet flow channels and plates on the two sides of the membrane has been investigated by Ansys Fluent software and the effect of membrane characteristics including: thickness, permeability and porosity coefficient on the mass (water) and heat transfer through the membrane and as a result the performance of the humidifier has been investigated. The results show that the use of Nafion 111 due to its lower thickness compared to Nafion 115, 117 and 211, leads to improved heat and mass transfer and therefore improves the performance of the membrane humidifier. Considering the dew point which shows the simultaneous effect of mass and heat transfer; increasing the permeability coefficient of the membrane from 10^{-15} to 10^{-21} square meters, the dew point temperature at the outlet of the dry side increases by about 3.5K. In the common limits of the porosity coefficient of common commercial membranes, the change of the porosity coefficient does not have much effect on the performance of the membrane humidifier.*

Key Words Membrane Humidifier, Permeability, Porosity Coefficient, Thickness, Dew Point Temperature, Numerical Modeling.

---

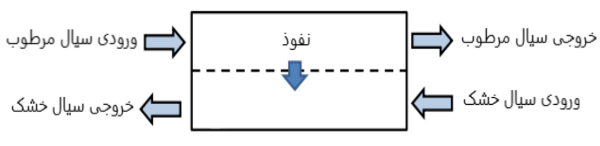
* تاریخ دریافت مقاله۱۴۰۱/۱۲/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۰۳/۱۳ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، اصفهان.
(۲) نویسندۀ مسئول، دانشیار، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، اصفهان.
Email: e.afshari@eng.ui.ac.ir

مقدمه

غشا عموما یک مانع انتخابی بین دو فاز است و برای جدا کردن یک فاز از فازی دیگر استفاده می‌شود. امروزه در صنعت برای جداسازی مخلوط‌ها از غشاها استفاده می‌شود؛ زیرا فرایندهای غشایی نسبت به سایر روش‌های جداسازی دارای هزینه‌های کمتر و کارایی بالاتر هستند [1,2]. غشا می‌تواند از بسیاری از مواد نظیر سلولز، پلیمر، مواد معدنی، مایع پشتیبانی پلیمرها و غشاهای مصنوعی ساخته شود؛ اما غشاهای پلیمری به عنوان جدا کننده دو فاز، رایج‌تر و به طور گسترده‌تر در مرطوب‌سازهای غشایی به کار می‌روند [3].

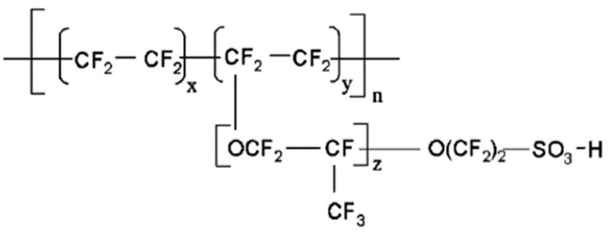
غشا، قلب یک مرطوب‌ساز غشایی است. مطابق شکل (۱)، جریان تغذیه (بخار آب یا سیال مرطوب) از طریق کانال‌هایی که در صفحه سمت مرطوب غشا تعبیه شده‌اند، به یک طرف غشا وارد می‌شود و آب موجود در جریان تغذیه در سراسر غشا نفوذ می‌کند. به دلیل طبیعت انتخابی غشا، فقط آب از آن عبور کرده و نگهدارنده در قسمت تغذیه باقی می‌ماند. نفوذپذیری آب در سراسر غشا می‌تواند به دلیل گرادیان‌های فشار، غلظت و دما باشد. در مرطوب‌ساز، علاوه بر انتقال آب از سمت مرطوب به سمت خشک، حرارت نیز از سمت گرم (معمولا سمت مرطوب) به سمت سرد (معمولا سمت خشک) منتقل می‌شود. به دلیل این که مرطوب‌سازی یک فرایند گرماگیر است؛ مولکول‌های آب با عبور از غشا گرما را جذب می‌کنند و به طرف خشک غشا منتقل می‌شوند [4]. با انتقال آب و گرما از سمت خشک به سمت مرطوب، سیال خشک ورودی به مرطوب‌ساز؛ مرطوب شده و از آن خارج می‌شود. این سیال که حالا مرطوب شده است سیال مورد هدف بوده و با جذب رطوبت و گرما دمای نقطه شبنم آن افزایش یافته است. خواص یک غشا شامل: جدا کننده خوب دو گاز خشک و مرطوب؛ پایداری حرارتی و هیدرولیکی بالا؛ نفوذپذیری بالا در برابر آب و هزینه ساخت پایین است. مشابه مبدل‌های حرارتی، آرایش جریان مخالف در مرطوب‌سازهای غشایی نیز عموما عملکرد بهتری نسبت به دیگر آرایش‌ها (موافق و متقاطع) دارد.



شکل ۱ انتقال آب و حرارت در مرطوب‌ساز غشایی

از نظر هندسی نیز دو نمونه غشا ورقه‌ای تخت و غشای لوله‌ای تو خالی وجود دارد. غشاهای ورقه‌ای تخت برای مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. ضخامت این غشاها معمولا ۱۰۰ میکرومتر است. غشاهای لوله‌ای، لوله‌های توخالی هستند که غشا دیواره‌های این لوله‌ها است. قطر این لوله‌ها معمولا ۵۰۰ میکرومتر است و برای مبدل‌های حرارتی لوله – پوسته کاربرد دارند [5]. افت فشار بالا و توزیع ضعیف جریان هوا مهم‌ترین معایب غشاهای فیبر توخالی است [6]. برای کاهش افت فشار و ایجاد جریان آرام، غشاهای ورقه‌ای مسطح که متداول و از نظر تجاری در دسترس هستند؛ در مرطوب‌سازها کاربرد دارند [5,7,8].

اخیرا غشـــاهای متخلخل غیر فلورایدی مورد توجه قرار گرفته اســت؛ ولی چون نســبت به غشــاهای پلیمری پایداری، مقاومت طول عمر و بازده کمتری دارند، غشــاهای پلیمری در صنعت بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. نافیون نام تجاری پلیمری از جنس تترافلوئورو سولفونیک اسید بوده که از تجمع سدیم هیدروکسید داغ و سولفونیل کلراید تشکیل می شود و قابلیت انتقال آب – گاز و گاز – گاز را دارد. ترکیب شـــیمیایی نافیون در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲ ترکیب شیمیایی نافیون [9]

برای این که غشاها به خوبی وظیفه خود را انجام دهند؛ لازم اســت در ابتدا فعال‌ســازی شــوند [10]. نافیون‌های تجاری به عنوان متداول‌ترین غشاهای مورد استفاده در مرطوب‌ساز غشایی دارای ضخامت و مشخصات مختلفی هستند. به عنوان نمونه نافیون ۱۱۱ ضـــخامت کمتری از نافیون‌های ۱۱۵، ۱۱۷ و ۲۱۱ دارد. ضخامت غشا، نفوذپذیری و ضریب تخلخل غشا مهم‌ترین مشخصات نافیون هستند که بر عملکرد آن در موقع استفاده در مرطوب سازهای غشایی مؤثر می‌باشند. از این رو بررسی تأثیر این پارامترها بر مرطوب‌ساز غشایی بسیار حایز اهمیت است.

مطالعات مختلفی در زمینه مرطوب‌ساز غشایی انجام شده

است. جیانگ و همکاران [11] اثر ضخامت غشای نافیون را روی پارامترهای متعدد غشا بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که غشای ضخیم‌تر، نفوذپذیری کم‌تر یونی را در پی دارد. نیو و ژانگ [12] یک مدل نظری برای پیش‌بینی عملکرد غشا توسعه دادند و اثرات حالت‌های ورودی دو جریان هوا و ویژگی‌های جذب غشاها را بر اثر بخشی غشا بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که رطوبت هوای ورودی تا حد زیادی بر کارایی مبدل تأثیر می‌گذارد. کیستلر و کاسلر [6] در یک مطالعه، غشاهای پلیمری لوله‌ای توخالی را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که انتقال جرم آب در این غشاها تقریبا دو برابر بیشتر از غشاهای تخت است. عیب غشاهای لوله‌ای این است که مقاومت در برابر فشار بیشتری از نوع ورقه‌ای دارند و این عامل باعث می‌شود مدل آن‌ها تجاری-سازی نشود. بوی و همکاران [13] یک غشا کامپوزیت با ورق مسطح، لایه‌های سرامیکی و پلیمری ساختند و عوامل کلیدی مانند فشار، سرعت و رطوبت نسبی هوا که بر عملکرد رطوبت-زدایی و ضریب عملکرد تحت یک جریان متقاطع تأثیر می‌گذارد را از طریق شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدل‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که عملکرد رطوبت‌زدایی غشا به رطوبت هوای مرطوب بستگی ندارد؛ در حالی که ضریب عملکرد آن به نفوذپذیری غشا و سرعت هوای مرطوب بستگی دارد. آن‌ها در مطالعه‌ای دیگر [14] جنبه‌های اساسی نفوذ آب، جذب و انتشار انرژی برای خواص غشای کامپوزیت ورقه مسطح را بررسی کردند تا نقش و تأثیر LiCl را بر پدیده‌های انتقال آب در مواد غشایی روشن کنند. علاوه بر این، LiCl میزان جذب آب و سرعت انتشار را بهبود می‌بخشد و نفوذ بخار آب در غشا زیاد می‌شود. نسیف و همکاران [15] عملکرد حرارتی مبدل حرارتی غشایی را بررسی کردند. آن‌ها از کاغذ کرافت به وزن ۶۰ گرم به عنوان غشا برای بازیابی انرژی استفاده کردند تجزیه و تحلیل انرژی در مدل‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که سیستم تهویه مطبوع با یک مبدل حرارتی غشایی نسبت به سیستم تهویه مطبوع معمولی در آب و هوای گرم و مرطوب انرژی کمتری مصرف می‌کند. نیو و ژانگ [16] اثر صرفه‌جویی انرژی در مبدل آنتالپی مبتنی بر غشا را مطالعه قرار کردند. آن‌ها تأثیر مواد غشایی بر عملکرد سیستم و مقاومت انتقال رطوبت را بررسی کردند. مین و سو [17,18] اثرات رطوبت هوا و دمای هوا را بر عملکرد یک دستگاه تهویه‌مطبوع مبتنی بر غشا و فرایندهای غشایی در هر دو فصل گرم و سرد مطالعه کردند. با افزایش رطوبت، حساسیت غشا کاهش می‌یابد و افزایش ضخامت غشا انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. ژانگ و همکاران [19] روشی برای آماده‌سازی غشاهای نامتقارن استات سلولز جهت انتقال گرما و رطوبت ارائه دادند. مقاومت غشاها در برابر حرارت کم است و از این‌رو غشاها قابلیت انتقال حرارت بالایی دارند. با این حال، تفاوت زیادی در میزان مقاومت در برابر انتقال رطوبت برای غشاهای مختلف وجود دارد. پارک و اه [20] یک مدل تحلیلی یک بعدی برای بررسی ظرفیت رطوبت‌زنی مرطوب‌ساز غشایی از جنس نافیون معرفی کردند. نتایج نشان می‌دهد به علت این که نفوذپذیری آب تا حد زیادی به ضخامت نافیون بستگی دارد؛ غشای نازک نافیون منجر به رطوبت‌نسبی بالاتر در سمت خروجی هوای خشک می-شود. مین و همکاران [21,22] نفوذ بخار آب را از طریق پلی وینیلیدن فلوراید، پلی اتر سولفون و غشا سلولز مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که غشا با جنس پلی وینیلیدن فلوراید حداکثر انتشار و غشا با جنس پلی اتر سولفون حداقل انتشار را دارد. ژانگ و همکاران در مطالعه‌ای عددی، انتقال گرما و جرم را در مبدل‌های آنتالپی صفحه موازی با غشاهای مختلف سه ماده کاغذ، استات سلولز و استارت سلولز اصلاح شده بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که غشای اصلاح شده به دلیل ضخامت کم، شیب جذب تند و پتانسیل‌های جذب زیاد، بالاترین عملکرد را دارد. فیروزجایی و همکاران [23] یک مرطوب‌ساز غشایی صفحه‌ای را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش دمای سمت مرطوب از ۵۰ به ۸۰ درجه سلسیوس دمای گاز خروجی افزایش می‌یابد و سرعت انتقال بخار غشا سه برابر می‌شود. هاشمی و همکاران [24] یک مرطوب‌ساز غشایی را به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی کردند. آن‌ها دریافتند که افزایش تخلخل، نفوذپذیری و دما در طرف‌های خشک و مرطوب و کاهش ضخامت غشا، باعث افزایش جریان جرمی ورودی بخار آب و بهبود عملکرد مرطوب‌ساز می‌شود. نگیا ووآ و همکاران [25] یک مرطوب‌ساز غشایی را مدل‌سازی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش رطوبت نسبی، دما و سرعت جریان در سمت مرطوب نرخ انتقال جرم از غشا افزایش می‌یابد. آن‌ها در مطالعه‌ای دیگر [26] دریافتند که بالاترین عملکرد مرطوب‌ساز در نرخ جریان ثابت سمت مرطوب و خشک رخ می‌دهد. ژان و همکاران [27] یک مرطوب‌ساز غشایی را

مدل‌سازی کردند و به این نتیجه رسیدند که فشار عملیاتی با نرخ انتقال آب نسبت معکوس دارد. ولفنستتر و همکاران [28] در یک مطالعه تجربی، غشاهای مختلف را در مرطوب‌ساز مورد بررسی قرار دادند. به این نتیجه رسیدند که رطوبت نسبی بیشترین تأثیر را در نفوذ غشا دارد. لی و همکاران [29] انتقال حرارت و رطوبت نسبی در یک مرطوب‌ساز غشایی با غشاهای کاغذی مبتنی بر سلولز و غشاهای پلیمری مصنوعی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که استفاده از غشاهای استات مبتنی بر سلولز و غشاهای پلیمری مصنوعی با استفاده از مواد کامپوزیتی و افزودنی‌های آبدوست، بهبود زیادی در انتقال رطوبت دارد. یان و همکاران [30] یک مرطوب‌ساز غشایی را با ضخامت غشاهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش ضخامت غشا مقاومت غشا در برابر انتقال جرم و حرارت افزایش می‌یابد.

در مطالعات گذشته که در زمینه مرطوب‌ساز غشایی انجام شده است؛ عمدتا تمرکز روی ساختار غشا، تحلیل ترمودینامیکی تعیین نحوه انتقال آب و حرارت، مشخصات و هندسه کانال‌های جریان مرطوب و خشک بوده است. در این مطالعه یک مرطوب-ساز تخت غشایی به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی عددی شده و پدیده‌های انتقال حرارت و انتقال آب در نواحی مختلف آن و تأثیر میزان انتقال آب و حرارت بر عملکرد آن بررسی شده است. به کمک این مدل عددی، بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر غشا شامل ضخامت، نفوذپذیری و ضریب تخلخل بر انتقال آب، انتقال حرارت، دمای نقطه شبنم و عملکرد مرطوب‌ساز از مهم‌ترین اهداف این پژوهش است.

معادلات حاکم

به دلیل پیچیدگی‌هایی که در حل معادلات حاکم بر مرطوب ساز وجود دارد، فرضیات زیر را در نظر گرفته شده است.

۱. جریان آرام، دائم و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود.
۲. انتقال آب به صورت تک‌فاز در نظر گرفته می‌شود.
۳. فشار پایین بوده و مخلوط گازها، گاز کامل است.
۴. دیواره مرطوب ساز کاملا عایق و انتقال حرارت فقط از طریق غشا اتفاق می‌افتد.
۵. لایه متخلخل (غ شا) همگن و غ شا فقط ن سبت به بخار آب نفوذپذیر و نسبت به سایر گازها نفوذناپذیر است.
۶. از تأثیر گرانش صرف نظر می‌شود.

معادلات (۱) تا (۵) معادلات حاکم و شـــامل معادلات بقا جرم، مومنتوم (در سه راستا)، انرژی و اجزا است [31].

$$\frac{\partial F}{\partial x}+\frac{\partial C}{\partial y}+\frac{\partial H}{\partial z}=J \qquad (۱)$$

$$F=\begin{Bmatrix}\rho\varepsilon u\\ \rho\varepsilon u^2+\varepsilon P\\ \rho\varepsilon uv\\ \rho\varepsilon uw\\ \rho\varepsilon u C_p T-k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x}\\ \rho\varepsilon u C^i T-D^i{}_{eff}\frac{\partial C_i}{\partial x}\end{Bmatrix} \qquad (۲)$$

$$G=\begin{Bmatrix}\rho\varepsilon v\\ \rho\varepsilon uv\\ \rho\varepsilon v^2+\varepsilon P\\ \rho\varepsilon wv\\ \rho\varepsilon v C_p T-k_{eff}\frac{\partial T}{\partial y}\\ \rho v\varepsilon C^i T-D^i{}_{eff}\frac{\partial C_i}{\partial y}\end{Bmatrix} \qquad (۳)$$

$$H=\begin{Bmatrix}\rho\varepsilon w\\ \rho\varepsilon uw\\ \rho\varepsilon vw\\ \rho\varepsilon w^2+\varepsilon P\\ \rho\varepsilon w C_p T-k_{eff}\frac{\partial T}{\partial z}\\ \rho w\varepsilon C^i T-D^i{}_{eff}\frac{\partial C_i}{\partial z}\end{Bmatrix} \qquad (۴)$$

$$J=\begin{Bmatrix}0\\ \frac{-\mu}{K}u\\ \frac{-\mu}{K}v\\ \frac{-\mu}{K}w\\ 0\\ 0\end{Bmatrix} \qquad (۵)$$

در معادلات بالا، ρ، μ و C_p به ترتیب چگالی، ویسکوزیته و ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط گاز است. ε و K ضریب تخلخل (برای کانال‌ها برابر ۱ و برای غشا با توجه به نوع غشا مشخص می‌شود) و ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل (غشا) است. همچنین P، T، u، v و w به ترتیب فشار، دمای مخلوط گاز و مؤلفه‌های سرعت در راستاهای x، y و z است. k_{eff} ضریب هدایت حرارتی مؤثر است که در کانال‌ها مربوط به مخلوط هوای خشک و مرطوب و در غشا از رابطه (۶) به دست می‌آید [32].

$$k_{eff}=\frac{1}{\frac{1-\varepsilon}{3k_m}+\frac{\varepsilon}{2k_m+k_w}}-2k_m \qquad (۶)$$

در رابطه بالا، k_m و k_w به ترتیب ضـــریب هدایتی غشـــا و بخار آب است.

در معادله بقای اجزا، C^i غلظت جز i اســت. ضــریب پخش

مؤثر جز i در غشا و ضریب پخش هر جز در کانال‌ها به ترتیب از معادله‌های (۷) و (۸) به‌دست می‌آید [25].

$$D_{eff}^{i} = \varepsilon^{1/5} D^{i} \quad (۷)$$

$$D^{i} = D_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1/5} \left(\frac{P_0}{P}\right) \quad (۸)$$

در معادلات بالا، D^i ضریب پخش جز i در مخلوط گاز است، D^i_{eff} ضریب پخش مؤثر جز *i* در محیط متخلخل، D_0 ضریب پخش در دما و فشار استاندارد T_0 و P_0 می‌باشد. همچنین، ضریب پخش آب در غشا از رابطه (۹) به‌دست می‌آید [33].

$$D_m^{H_2o} = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-7}\lambda(e^{0.28\lambda} - 1).e^{-\frac{2346}{T}} & 0 < \lambda \le 3 \\ 4.17 \times 10^{-7}\lambda(1 + 161e^{-\lambda}).e^{-\frac{2346}{T}} & \lambda > 3 \end{cases} \quad (۹)$$

در معادله بالا، λ ظرفیت آب غشا است و از رابطه (۱۰) به‌دست می‌آید.

$$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 33a^3 & 0 < a \le 1 \\ 14 + 1.4(a-1) & 1 < a \le 3 \end{cases} \quad (۱۰)$$

در معادله بالا، a فعالیت بخار آب در غ شا ا ست و از رابطه (۱۱) زیر به‌دست می‌آید [33].

$$a = \frac{c^{H_2o}RT}{P_{sat}} \quad (۱۱)$$

در رابطه بالا، R ثابت گاز، P_{sat} فشار ا شباع و C^{H_2o} غلظت آب در غشا است.

عملکرد مرطوب‌ساز بهتر است با دمای نقطه شبنم ارزیابی شود. دمای نقطه شبنم تأثیر همزمان میزان آب و حرارت عبوری از غشا به سمت کانال خشک را نشان می‌دهد. هر چه دمای نقطه شبنم بالاتر باشد؛ عملکرد مرطوب‌ساز بهتر است. همان‌طور که از معادله‌های (۱۲) و (۱۳) مشخص است؛ برای به دست آوردن دمای نقطه شبنم باید رطوبت نسبی و فشار اشباع در خروجی خشک معلوم باشد [34].

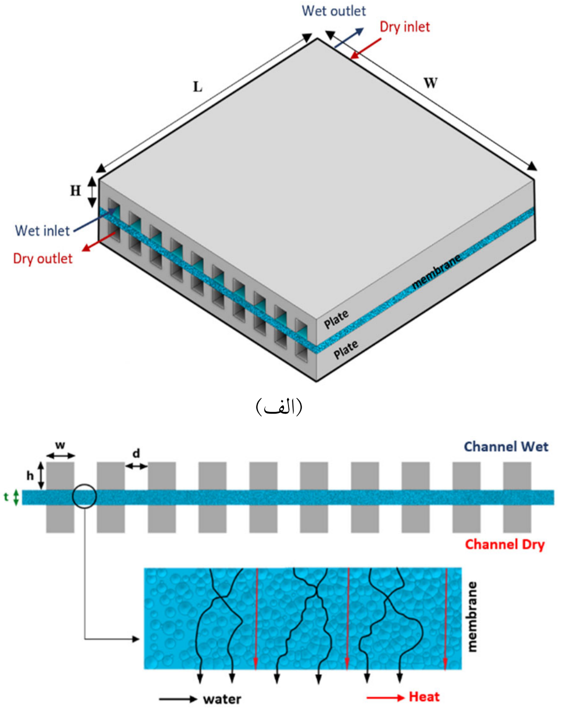
$$P_{sat(T=Dew\ point)} = P_{sat(T=T_{dry})} \times \varphi dry \quad (۱۲)$$

$$P_{sat} = 0.61078 \exp\left(\frac{17.27T}{273.3+T}\right) \quad (۱۳)$$

در روابط بالا، φ رطوبت نسبی، P_{sat} فشار اشباع (کیلو پاسکال) و T بر حسب درجه سلسیوس و زیرنویس dry مربوط به سمت خشک است.

مدل‌سازی عددی

شکل (۳-الف) دامنه مدل‌سازی یک مرطوب‌ساز تخت غشایی با آرایش کانال‌های ساده و موازی را ، با جریان مخالف نشان می‌دهد که از چهار بخش اصلی شامل غشا، صفحات نگهدارنده در دو طرف غشا، کانال‌های عبور جریان خشک و کانال‌های عبور جریان مرطوب تشکیل شده است. غشا محیطی متخلخل است که در شکل نیز نشان داده شده است. هوای گرم و مرطوب از سمت کانال‌های مرطوب به طرف کانال‌های خشک جریان می‌یابد. به دلیل بالاتر بودن غلظت آب در سمت مرطوب، آب از میان تخلخل‌های غشا به سمت خشک منتقل می‌شود (فلش‌های مشکی در شکل (۳-ب)). نفوذپذیری، ضریب تخلخل و ضخامت غشا، عوامل مؤثر بر انتقال اب هستند. حرارت نیز توسط مکانیسم‌های جابه‌جایی و هدایت از سمت مرطوب به سمت خشک منتقل می‌شود (فلش‌های قرمز در شکل (۳-ب)).



(الف)

(ب)

شکل ۳ شماتیکی از مرطوب‌ساز غشایی، (الف) نمای سه‌بعدی، (ب) نمای دو بعدی به همراه ساختار غشا و عبور آب و حرارت از آن

م شخصات و ابعاد هند سی و همچنین شرایط عملکردی مورد نیاز برای مدل سازی مرطوب ساز غ شایی در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱ مشخصات هندسی، شرایط عملکردی و خواص مربوط به گازها در مرطوب‌ساز ساده

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
طول / عرض	W/ L	mm	۱۱۴/۱۰۰
ارتفاع/ عرض / فاصله کانال‌ها	d / w / h	mm	۲/۲/۴
ارتفاع صفحات	H	mm	۵
ضخامت غشا	t	µm	۱۲۷
ضریب هدایت حرارتی غشا	k	$W.m^{-1}k^{-1}$	۲
چگالی غشا خشک	-	$kg.m^{-3}$	۱۹۸۰
وزن معادل غشا	-	$kg.mol^{-3}$	۱/۱
نفوذپذیری غشا	K	m^2	۱×۱۰^{-۱۹}
ضریب تخلخل غشا	ε	-	۰/۵

روش حل عددی

ترم‌های مختلف معادلات مربوط به مرطوب‌ساز غشایی به روش حجم محدود گسسته‌سازی می‌شوند. برای گسسته‌سازی پارامترهای فشار و سرعت و محتوای آب به ترتیب از گسسته‌سازی مرتبه دوم، روش بالادستی مرتبه دوم و روش بالادستی مرتبه اول استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی مرطوب‌ساز غشایی از نرم‌افزار فلوئنت استفاده می‌شود و با اضافه کردن یک کد به آن، انتقال آب در غشا مدل‌سازی می‌گردد. در ادامه با استفاده از الگوریتم سیمپل و با فرض فشار مبنا در نرم‌افزار فلوئنت میدان‌های فشار و سرعت حل می‌شوند. این الگوریتم با انجام یک روند تکراری، حل را تا رسیدن به همگرایی نتایج با دقت $۱۰^{-۶}$ انجام می‌دهد. به علت وابسته بودن خواص فیزیکی و شیمیایی به خواص انتقالی، معادلات بقا در مرطوب‌ساز به شدت به یکدیگر کوپل هستند. مهم‌ترین علت انتخاب این روند تکراری کوپل بودن معادلات با یکدیگر هستند. برای شروع عملیات حل از ضرایب زیر تخفیف پیش فرض فلوئنت استفاده می‌شود و با مشاهده نتایج، چنان چه بعد از چند تکرار نتایج همگرا بود؛ حل متوقف می‌شود. برای حل سریع‌تر و رسیدن به همگرایی بهتر ضرایب زیر تخفیف به صورت دستی تغییر می‌کند. چنانچه این ضرایب بیش از حد بزرگ باشد مجدد حل واگرا می‌شود. با توجه به تجربیات و مدل‌سازی‌های انجام شده قبلی بهترین ضرایب زیرتخفیف برای معادلات ممنتوم، فشار و معادلات جرم به ترتیب برابر ۰/۳، ۰/۷ و ۰/۹۵ است.

استقلال حل از شبکه

درصد جرم آب خروجی سمت خشک به عنوان یک پارامتر مناسب برای بررسی عدم وابستگی نتایج به به تعداد شبکه در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد هرچه تعداد شبکه و سلول‌های محاسباتی زیادتر شود؛ حل دقیق‌تر است. همان‌طور که در جدول (۲) آمده است؛ با افزایش تعداد شبکه‌های محاسباتی تا ۲۳۸۰۰۰ سلول، مقدار درصد جرم آب خروجی سمت خشک از تعداد شبکه مستقل می شود. این امر نشان دهنده این است که با تغییر دادن تعداد شبکه، نتایج حل عددی تغییر چندانی نمی‌کند.

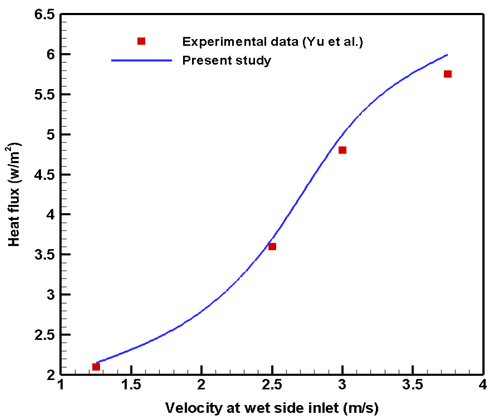
جدول ۲ بررسی استقلال نتایج از تعداد شبکه محاسباتی

درصد جرمی آب در خروجی سمت خشک	تعداد شبکه محاسباتی
۰/۵۶۳۷۲	۶۶۰۰۰
۰/۰۱۵۶۴	۱۱۰۰۰۰
۰/۰۱۷۲۶۰	۲۰۰۰۰۰
۰/۰۱۹۹۷۰	۲۳۸۰۰۰
۰/۰۲۰۰۰۰	۲۶۵۰۰۰

نتایج

اعتبارسنجی

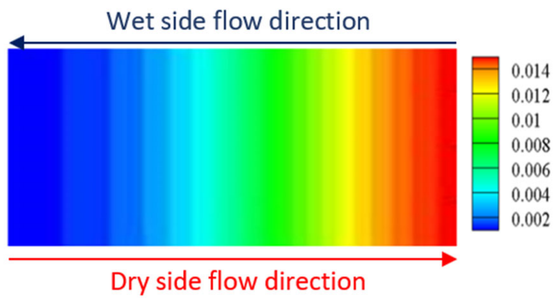
برای اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی انجام شده، نتایج این مطالعه و مطالعه تجربی یو و همکاران با انتخاب مقدار شار حرارتی به عنوان یک معیار اعتبارسنجی مقایسه شده است. از شکل (۴) مشاهده می‌شود که تطابق زیادی بین مطالعات ایجاد شده است. لازم به ذکر است که در سرعت بالاتر در سمت کانال‌های مرطوب، نتایج عددی به دلیل نادیده گرفتن اشباع آب از دقت پایین‌تری برخوردار است و تفاوت بین پاسخ‌ها ناشی از همین موضوع است. حداکثر خطای نتایج کمتر از ۴/۲٪ در بالاترین سرعت در سمت کانال‌های مرطوب بررسی شده است.



شکل ۴ مقایسه شارحرارتی خروجی سمت خشک بین نتایج تجربی [35] و مطالعه حاضر

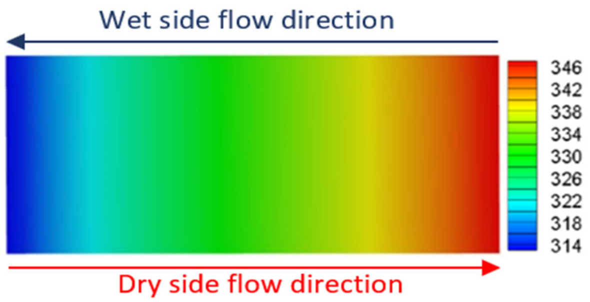
تغییرات غلظت آب و دما در غشا

شکل (۵) کانتور غلظت آب را روی صفحه‌ای در مرکز غشا و موازی جریان هوای خشک و مرطوب نشان می‌دهد. جریان هوای گرم و مرطوب از سمت راست به چپ و جریان هوای خشک از سمت چپ به راست است. همان‌طور که مشخص است، ماکزیمم و مینیمم غلظت آب در غشا مربوط به ورودی جریان مرطوب و خشک و برابر ۰/۰۱۴ و ۰/۰۰۲ است. با فاصله گرفتن از ورودی سمت مرطوب، غلظت آب انتقال یافته از سمت کانال‌های مرطوب به سمت کانال‌های خشک به دلیل کاهش تبادل جرم، کاهش می‌یابد. با نزدیک شدن به خروجی سمت خشک، به دلیل افزایش تبادل جرم در مرطوب‌ساز، مقدار غلظت آب افزایش می-یابد.



شکل ۵ توزیع غلظت آب (کیلومول بر مترمکعب) بر صفحه در مرکز غشا مرطوب‌ساز

همچنین از شکل (۵) مشخص است که در همه جای غشا انتقال جرم (آب) رخ داده است و بیانگر این موضوع است که غشا کاملا خیس و مرطوب است و می‌تواند وظیفه خود را به خوبی ایفا کند. شکل (۶) کانتور دما روی صفحه‌ای در مرکز غشا و به موازات کانال‌های سمت خشک و مرطوب مرطوب‌ساز را نشان می‌دهد. جریان هوای گرم و مرطوب از سمت راست به چپ و جریان هوای خشک از سمت چپ به راست است. مطابق شکل، دما در مرکز غشا و در سمت مسیر ورودی جریان گرم و مرطوب زیاد و در ادامه به دلیل افزایش انتقال انرژی و جرم، کاهش می‌یابد. همچنین، دما در غشا و در راستای مسیر جریان خشک به دلیل افزایش فرصت تبادل حرارت بین کانال‌های خشک و مرطوب انتقال انرژی و جرم، افزایش می‌یابد.

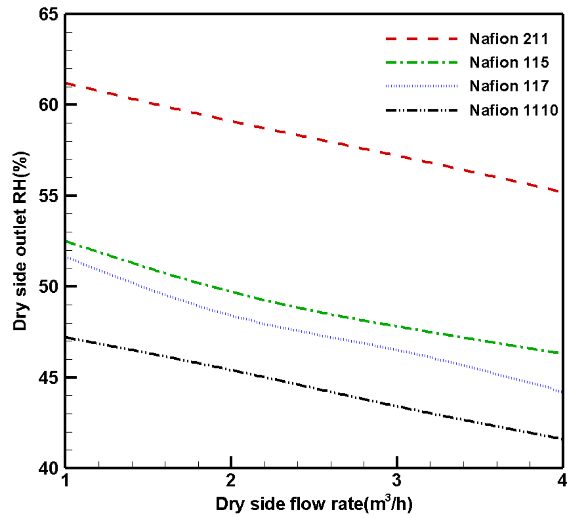


شکل ۶ توزیع دما (کلوین) روی صفحه در مرکز غشا مرطوب‌ساز

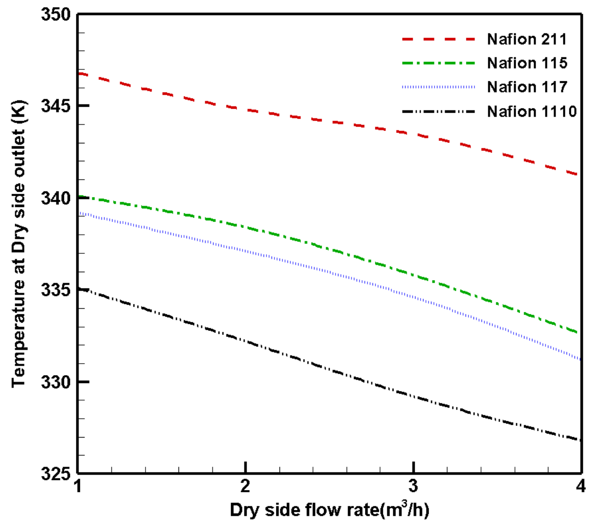
تأثیر ضخامت غشا بر عملکرد مرطوب‌ساز

جهت بررسی تأثیر ضخامت غشا بر عملکرد مرطوب‌ساز، چهار غشای نافیون شامل نافیون‌های ۱۱۵ (ضخامت ۱۲۷ میکرومتر)، ۱۱۷ (ضخامت ۱۸۳ میکرومتر)، ۲۱۱ (ضخامت ۵۰/۸ میکرومتر)، ۱۱۱ (ضخامت ۲۵۴ میکرومتر) مطالعه شده است. همان‌طور که از شکل‌های (۷) و (۸) مشخص است؛ در یک دبی مشخص سمت خشک، با افزایش ضخامت غشا به دلیل افزایش مقاومت غشا در برابر نفوذ انتقال جرم و انرژی، میزان انتقال جرم (رطوبت نسبی) و انتقال انرژی (انتقال حرارت) کاهش می‌یابد و طبق معادله (۶) با کاهش دما و درصد رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم نیز افت می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین رطوبت نسبی در بین چهار نوع غشای ذکر شده مربوط به نافیون ۲۱۱ است. همچنین از شکل (۸) می‌توان فهمید که حرارت انتقال یافته از طرف کانال‌های مرطوب به طرف کانال‌های خشک در نافیون ۲۱۱ بهتر از سه نوع نافیون دیگر است. شکل (۹) دمای نقطه شبنم خروجی کانال‌های خشک را برای چهار نوع غشا نشان می‌دهد. دمای نقطه شبنم در یک دبی ثابت در سمت خشک و مرطوب با افزایش ضخامت غشا، کاهش می‌یابد. به دلیل این‌که ضخامت نافیون‌های ۱۱۵ و۱۱۷ تقریبا یکسان است؛ تغییرات رطوبت نسبی، دمای خروجی و دمای خروجی نقطه شبنم در سمت خشک در این دو مرطوب‌ساز اندک است. چون ضخامت نافیون ۲۱۱ خیلی کمتر از نافیون ۱۱۵ است؛ رطوبت نسبی و دمای خروجی و دمای خروجی نقطه شبنم در سمت خشک بیشتر است.

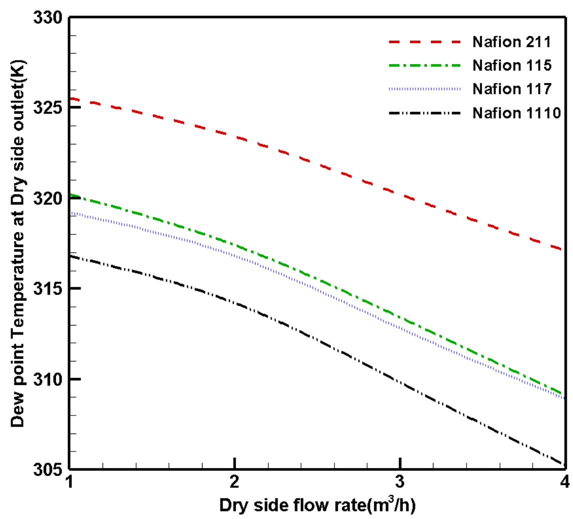
با استفاده از مدل‌سازی عددی انجام شده نتیجه می‌شود که بیشترین و کمترین افت فشار در طول کانال‌های خشک مرطوب-ساز مربوط به غشاهای نافیون ۲۱۱ و ۱۱۱ است که به ترتیب برابر است با ۱۴/۳ و ۱۱/۳ پاسکال است.



شکل ۷ تأثیر ضخامت غشا بر رطوبت نسبی خروجی سمت خشک



شکل ۸ تأثیر ضخامت غشا بر دمای خروجی سمت خشک

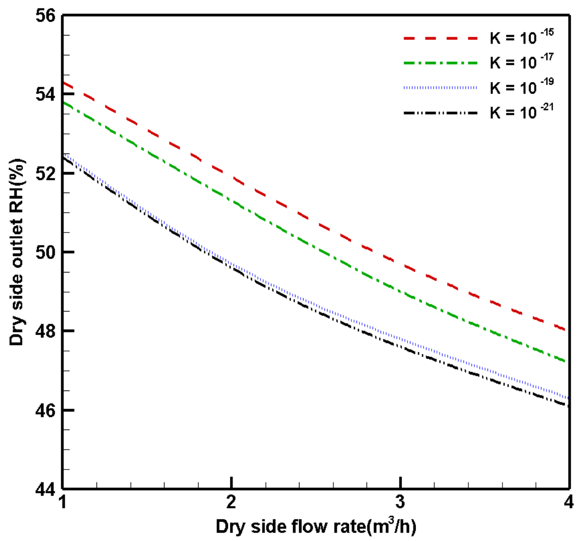


شکل ۹ تأثیر ضخامت غشا بر دمای نقطه شبنم خروجی سمت خشک

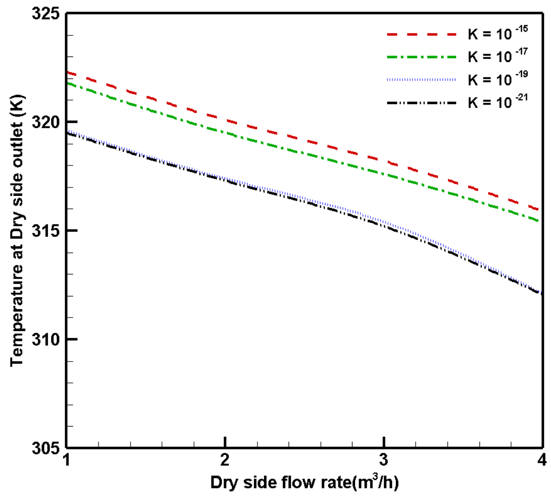
تأثیر نفوذپذیری غشا بر عملکرد مرطوب‌ساز

شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) تأثیر نفوذپذیری غشا (K) بر عملکرد مرطوب‌ساز، از جنس نافیون ۱۱۵ را برای ضریب نفوذپذیری‌های 10^{-15}، 10^{-17}، 10^{-19} و 10^{-21} متر مربع نشان می‌دهد. با مقایسه نمودارها مربوط به دو ضریب نفوذپذیری پایین، مشاهده می‌شود که با ضریب نفوذپذیری کمتر از 10^{-19} متر مربع، عملکرد مرطوب‌ساز غشایی تغییر زیادی نمی‌کند و تقریبا رطوبت خروجی، دمای خروجی و دمای نقطه شبنم در خروجی سمت خشک برابر با ضریب نفوذپذیری 10^{-21} متر مربع است. در دبی ثابت در سمت کانال‌های خشک و مرطوب، با افزایش ضریب نفوذپذیری تا 10^{-15} متر مربع به دلیل افزایش انتقال جرم و حرارت، رطوبت نسبی، انتقال حرارت و نقطه شبنم افزایش می‌یابد. استفاده از ضریب نفوذپذیری 10^{-15} در مقایسه با ضریب نفوذپذیری 10^{-19} متر مربع، رطوبت نسبی، دما و دمای نقطه شبنم در خروجی خشک به ترتیب ۴، ۱ و ۱ در صد بیشتر می شود. نفوذپذیری بر انتقال حرارت و بر انتقال جرم تأثیر گذاشته است؛ اما تأثیر آن بر انتقال جرم بیشتر است.

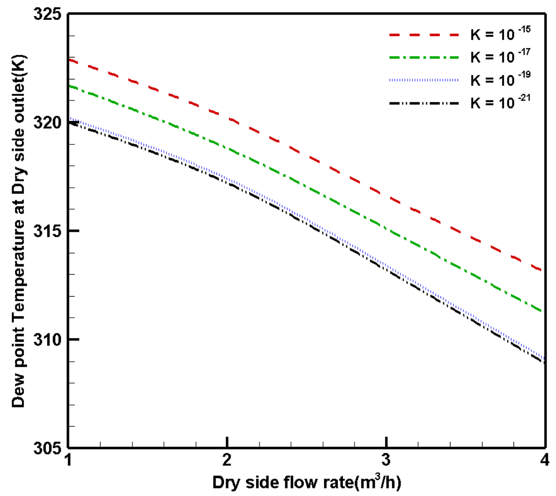
نتایج حاصل از مدل سازی نتیجه می‌دهد که افت فشار در طول کانال های خشک برای ضرایب نفوذ پذیری 10^{-15}، 10^{-17}، 10^{-19} و 10^{-21} به ترتیب برابر است با ۱۳/۹، ۱۲/۷، ۱۱/۹ و ۱۱/۴ پاسکال است.



شکل ۱۰ تأثیر نفوذپذیری غشا بر رطوبت خروجی سمت خشک



شکل ۱۱ تأثیر نفوذپذیری غشا بر دمای خروجی سمت خشک

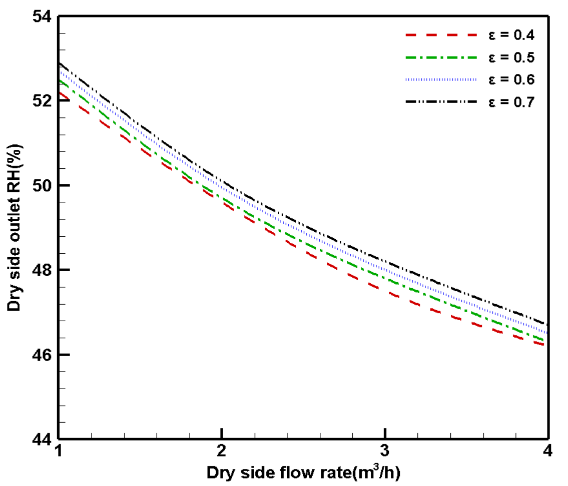


شکل ۱۲ تأثیر نفوذپذیری غشا بر دمای شبنم خروجی سمت خشک

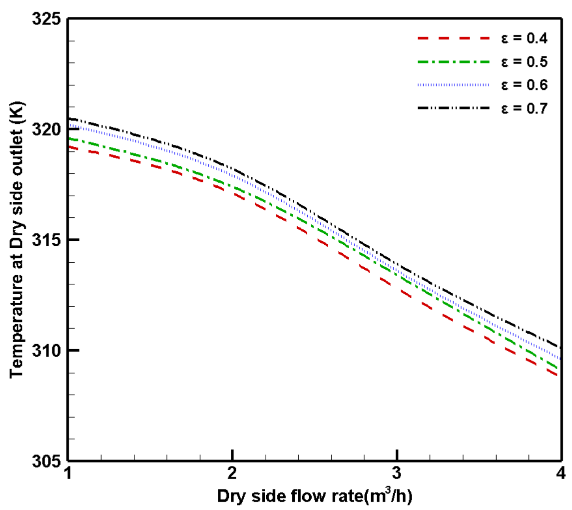
تأثیر ضریب تخلخل غشا بر عملکرد مرطوب‌ساز

ضریب تخلخل برابر نسبت فضای خالی به حجم کل فضای محیط متخلخل است. اگر یک محیط تمام سیال را در خود جای دهد ضریب تخلخل آن ۱ است. غشا یک محیط متخلخل است؛ زیرا تمام بخار آب را در خود جای نمی‌دهد. کانال‌های سمت خشک و مرطوب ضریب تخلخل ۱ را دارند. برای بررسی تأثیر ضریب تخلخل غشا (ε) بر عملکرد مرطوب‌ساز غشایی، غشا از جنس نافیون ۱۱۵ با ضریب تخلخل‌های ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ مدل‌سازی شده است. شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) به ترتیب مربوط به تأثیر ضریب تخلخل بر رطوبت نسبی، دما خروجی سمت خشک و دمای نقطه شبنم خروجی سمت خشک است.

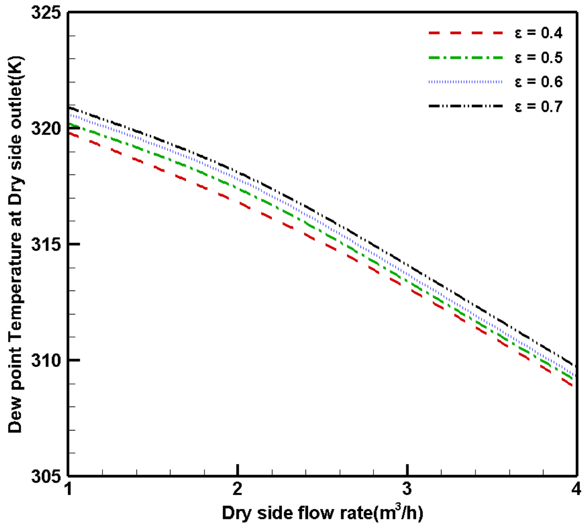
مطابق شکل‌ها، ضریب تخلخل تأثیر زیادی بر عملکرد مرطوب-ساز ندارد. به عبارتی، تأثیر دو مشخصه دیگر غشا (ضخامت و نفوذپذیری) نسبت به ضریب تخلخل غشا بر انتقال جرم و حرارت مرطوب‌ساز بیشتر است. همچنین از شکل (۱۳) مشخص است که در یک دبی مشخص سمت خشک و مرطوب، با افزایش ضریب تخلخل از ۰/۴ به ۰/۷، به دلیل نزدیک شدن ضریب تخلخل به ۱ و افزایش انتقال جرم و حرارت از سمت کانال‌های مرطوب به طرف کانال‌های خشک درصد رطوبت نسبی خروجی سمت خشک حدود ۱/۵ درصد افزایش می‌یابد. مطابق شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، بیشترین دمای خروجی و دمای نقطه شبنم خروجی سمت خشک مربوط به ضریب تخلخل ۰/۷ است که در دبی ۱ متر مکعب بر ساعت در طرف کانال‌های خشک اتفاق می‌افتد و به ترتیب ۳۲۰/۵ و ۳۲۰/۹ کلوین است.



شکل ۱۳ تأثیر ضریب تخلخل غشا بر رطوبت خروجی سمت خشک



شکل ۱۴ تأثیر ضریب تخلخل غشا بر دمای خروجی سمت خشک



شکل ۱۵ تأثیر ضریب تخلخل غشا بر دمای شبنم خروجی سمت خشک

افت فشـــار در طول کانال‌های خشـــک مرطوب‌ســـاز برای ضـــرایب تخلخل ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ به ترتیب برابر اســـت با ۱۰/۸، ۱۱/۹، ۱۲/۹ و ۱۳/۷ پاسکال است.

نتیجه گیری

در این مقاله به مدل سازی عددی و سه‌بعدی یک مرطوب ساز غشایی شامل تمامی نواحی آن (غشا، کانال‌های سمت خشک و مرطوب و صفحات دو طرف سمت خشک و مرطوب) پرداخته شده و تأثیر مشخصات اساسی غشا شامل ضخامت، نفوذپذیری و ضـــریب تخلخل بر انتقال آب و حرارت و به تبع آن عملکرد مرطوب ساز پرداخته شده ا ست. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌شود.

۱. در راستای طول کانال‌های سمت خشک مرطوب‌ساز، مقدار آب انتقال یافته از طریق غشا در سمت خروجی خشک به دلیل کاهش انتقال آب کاهش می‌یابد؛ هر چند که مقدار گرمای انتقال یافته توسط غشا در نزدیکی خروجی کانال‌های خشک افزایش می‌یابد.

۲. در بین ۴ نوع نافیون ۱۱۵، ۱۱۷، ۲۱۱ و ۱۱۱، نافیون ۱۱۱ به دلیل ضخامت کمتر، بیشترین رطوبت نسبی، دمای خروجی و دمای نقطه شبنم در خروجی سمت خشک و بهترین عملکرد در بین نافیون‌های دیگر را دارد.

۳. نفوذپذیری نافیون ۱۱۵ برای آب با ضریب‌های 10^{-19} و 10^{-21} تقریبا یکسان است. با افزایش نفوذپذیری تا 10^{-15} به دلیل افزایش انتقال جرم و حرارت، سبب افزایش رطوبت نسبی، انتقال حرارت و دمای نقطه شبنم می‌شود.

۴. ضریب تخلخل نافیون ۱۱۵ در ضریب تخلخل‌های ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ تغییر چندانی بر عملکرد مرطوب‌ساز غشایی ندارد. اگر ضریب تخلخل از ۰/۴ به ۰/۷ افزایش یابد، رطوبت نسبی در سمت خروجی کانال‌های خشک حدود ۱/۵ درصد افزایش می‌یابد.

علایم اختصاری

فعالیت بخار آب	a
ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت $(\frac{J}{kg.K})$	C_p
غلظت جز i $(\frac{mol}{m^3})$	C^i
غلظت آب در غشا $(\frac{mol}{m^3})$	C^{H_2O}
ضریب پخش جز i در مخلوط گاز $(\frac{m^2}{s})$	D^i
ضریب پخش مؤثر جز i در محیط متخلخل $(\frac{m^2}{s})$	D^i_{eff}
ضریب پخش در فشار و دمای استاندارد $(\frac{m^2}{s})$	D_0
ضریب پخش آب در غشا $(\frac{m^2}{s})$	$D_m^{H_2O}$
ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل $(\frac{1}{m^2})$	K
ضریب هدایت حرارتی مؤثر $(\frac{W}{m.K})$	k_{eff}
ضریب هدایت حرارتی غشا $(\frac{W}{m.K})$	k_m
ضریب هدایت حرارتی بخار آب $(\frac{W}{m.K})$	k_w
فشار مخلوط گاز (Pa)	P
ثابت جهانی گاز $(\frac{kJ}{kg.K})$	R
دما مخلوط گاز (°C)	T
سرعت در راستای x $(\frac{m}{s})$	u
سرعت در راستای y $(\frac{m}{s})$	v
سرعت در راستای z $(\frac{m}{s})$	w

حروف یونانی

چگالی $(\frac{kg}{m^3})$	ρ
ضریب تخلخل	ε
ظرفیت آب غشا	λ
رطوبت نسبی	φ
ویسکوزیته (Pa.s)	μ

واژه نامه

مرطوب‌ساز غشایی	Membrane Humidifier
نافیون	Nafion
سمت‌های خشک و مرطوب	Dry and Wet sides
رطوبت نسبی	Relative Humidity
نفوذپذیری	Permeability
شرایط عملکردی	Operating Conditions
غلظت آب	Water Concentration
ضرایب زیرتخفیف	Under Relaxation Factors

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] R. W. Baker, "Future directions of membrane gas separation technology," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 41, no. 6, pp. 1393–1411, (2002).

[2] W. J. Koros and R. Mahajan, "Pushing the limits on possibilities for large scale gas separation: Which strategies?," *Journal of Membrane Science*, vol. 181, no. 1, pp. 141, (2001).

[3] C. H. Li, C. Y. Chen, T. F. Yang, W. K. Li, and W. M. Yan, "Experimental study on heat and mass transfer of a multi-stage planar dehumidifier," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 148, pp. 119104, (2020).

[4] A. Ferraris et al., "Nafionr tubing humidification system for polymer electrolyte membrane fuel cells," *Energies*, vol. 12, no. 9, (2019).

[5] J. Woods, "Membrane processes for heating, ventilation, and air conditioning," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 290–304, (2014).

[6] K. R. Kistler and E. L. Cussler, "Membrane modules for building ventilation," *Chemical Engineering Research and Design* , vol. 80, no. 1, pp. 53–64, (2002).

[7] W. Albrecht, R. Hilke, K. Kneifel, T. Weigel, and K. V. Peinemann, "Selection of microporous hydrophobic membranes for use in gas/liquid contactors: An experimental approach," *Journal of Membrane Science*, vol. 263, no. 1–2, pp. 66–76, (2005). https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.04.005

[8] G. Glenn Lipscomb and S. Sonalkar, "Sources of non-ideal flow distribution and their effect on the performance of hollow fiber gas separation modules," *Separation and Purification Reviews*, vol. 33, no. 1, pp. 41–76, (2004).

[9] T. Maiyalagan and S. Pasupathi, "Components for PEM fuel cells: An overview," *Materials Science Forum* , vol. 657. (2010).

[10] H. Li et al., "A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell," *Journal of Power Sources*, vol. 178, no. 1, pp. 103–117, (2008).

[11] B. Jiang, L. Wu, L. Yu, X. Qiu, and J. Xi, "A comparative study of Nafion series membranes for vanadium redox flow batteries," *Journal of Membrane Science*, vol. 510, pp. 18–26, (2016).

[12] J. L. Niu and L. Z. Zhang, "Membrane-based Enthalpy Exchanger: Material considerations and clarification of moisture resistance," *Journal of Membrane Science*, vol. 189, no. 2, pp. 179–191, (2001).

[13] T. D. Bui, F. Chen, A. Nida, K. J. Chua, and K. C. Ng, "Experimental and modeling analysis of membrane-based air dehumidification," *Separation and Purification Technology*, vol. 144, pp. 114–122, (2015).

[14] D. T. Bui, A. Nida, K. C. Ng, and K. J. Chua, “Water vapor permeation and dehumidification performance of poly(vinyl alcohol)/lithium chloride composite membranes,” *Journal of Membrane Science,* vol. 498, pp. 254–262, (2016).

[15] M. Nasif, R. Al-Waked, G. Morrison, and M. Behnia, “Membrane heat exchanger in HVAC energy recovery systems, systems energy analysis,” *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 10, pp. 1833–1840, (2010).

[16] L. Z. Zhang and J. L. Niu, “Effectiveness correlations for heat and moisture transfer processes in an enthalpy exchanger with membrane cores,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 124, no. 5, pp. 922–929, (2002).

[17] R. Huizing, H. Chen, and F. Wong, “Contaminant transport in membrane based energy recovery ventilators,” *Science and Technology for the Built Environment*, vol. 21, no. 1, pp. 54–66, (2015).

[18] L. Wang, D. Curcija, and J. Breshears, “The energy saving potentials of zone-level membrane-based enthalpy recovery ventilators for VAV systems in commercial buildings,” *Energy and Buildings,* vol. 109, pp. 47–52, (2015).

[19] X. R. Zhang, L. Z. Zhang, H. M. Liu, and L. X. Pei, “One-step fabrication and analysis of an asymmetric cellulose acetate membrane for heat and moisture recovery,” *Journal of Membrane Science,* vol. 366, no. 1–2, pp. 158–165, (2011).

[20] S. Park and I. H. Oh, “An analytical model of NafionTM membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cells,” *Journal of Power Sources*, vol. 188, no. 2, pp. 498–501, (2009).

[21] J. Min, T. Hu, and X. Liu, “Evaluation of moisture diffusivities in various membranes,” *Journal of Membrane Science*, vol. 357, no. 1–2, pp. 185–191, (2010).

[22] J. Min, T. Hu, and Y. Song, “Experimental and numerical investigations of moisture permeation through membranes,” *Journal of Membrane Science*, vol. 367, no. 1–2, pp. 174–181, (2011).

[23] V. Kord Firouzjaei, S. M. Rahgoshay, and M. Khorshidian, “Planar membrane humidifier for fuel cell application: Numerical and experimental case study,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 147, pp. 118872, (2020).

[24] S. Z. Hashemi-Valikboni, S. S. M. Ajarostaghi, M. A. Delavar, and K. Sedighi, “Numerical prediction of humidification process in planar porous membrane humidifier of a PEM fuel cell system to evaluate the effects of operating and geometrical parameters,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 141, no. 5, pp. 1687–1701, (2020).

[25] H. N. Vu, X. L. Nguyen, J. Han, and S. Yu, “A study on vapor transport characteristics in hollow-fiber membrane humidifier with empirical mass transfer coefficient,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 177, pp. 121549, (2021).

[26] H. N. Vu, X. L. Nguyen, and S. Yu, “A Lumped-Mass Model of Membrane Humidifier for PEMFC,” *Energies*, vol. 15, no. 6, (2022).

[27] X. L. Nguyen, H. N. Vu, and S. Yu, “Parametric understanding of vapor transport of hollow fiber membranes for design of a membrane humidifier,” *Renewable Energy*, vol. 177, pp. 1293–1307, (2021).

[28] F. Wolfenstetter, M. Kreitmeir, L. Schoenfeld, H. Klein, M. Becker, and S. Rehfeldt, "Experimental study on water transport in membrane humidifiers for polymer electrolyte membrane fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 55, pp. 23381–23392, (2022).

[29] J. Li et al., "A review of air-to-air membrane energy recovery technology for building ventilation," *Energy and Buildings*, vol. 265, pp. 112097, (2022).

[30] W. Yan et al., "Effects of membrane characteristics on the evaporative cooling performance for hollow fiber membrane modules," *Energy*, vol. 270, no. November 2022, pp. 126873, (2023).

[31] J. D. Anderson, "Governing Equations of Fluid Dynamics," *Computational Fluid Dynamics*, pp. 15–51, (1992).

[32] N. B. Houreh, E. Afshari, H. Shokouhmand, and S. Asghari, "Numerical study and experimental validation on heat and water transfer through polymer membrane by applying a novel enhancement technique," *Journal of Energy Storage*, vol. 29, no. March, pp. 101387, (2020).(In Persian).

[33] Y. Wang and C. Y. Wang, "Simulation of flow and transport phenomena in a polymer electrolyte fuel cell under low-humidity operation," *Journal of Power Sources*, vol. 147, no. 1–2, pp. 148–161, (2005).

[34] N. Baharlou Houreh, M. Ghaedamini, H. Shokouhmand, E. Afshari, and A. H. Ahmaditaba, "Experimental study on performance of membrane humidifiers with different configurations and operating conditions for PEM fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 7, pp. 4841–4859, (2020). (In Persian).

[35] S. Yu et al., "A parametric study of the performance of a planar membrane humidifier with a heat and mass exchanger model for design optimization," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 7–8, pp. 1344–1351, (2011).